

文章编号: 1000-5862(2014)02-0136-04

# 基于双面金属包覆波导光强差分信号的波长锁定

杨 振, 王贤平, 桑明煌\*

(江西师范大学物理与通信电子学院, 江西 南昌 330022)

**摘要:** 利用双面金属包覆波导中超高阶导模对激光波长高度灵敏的特性, 提出了一种基于光强差分信号的波长锁定方法, 可有效地避免激光光强波动所带来的误差, 使激光波长锁定稳定度进一步提高. 该方法能实现皮米量级的激光波长锁定, 且其制作工艺简单.

**关键词:** 双面金属包覆波导; 超高阶导模; 光强差分信号; 波长锁定

**中图分类号:** TN 252

**文献标志码:** A

## 0 引言

目前, 为了满足电信网络容量的爆炸式增长需求, 密集波分复用(Dense Wavelength Division Multiplexing, DWDM)<sup>[1-3]</sup>系统已成为优化网络的首选方案. 因为通过该系统, 信道数目及信容量能得以大大增加, 但与此同时信道的间隔越来越小. 国际通信联盟(ITU)规定波长标准的间隔为100 GHz(0.8 nm), 进一步增加信道后, DWDM的间隔可以缩小至25 GHz(0.2 nm)<sup>[4]</sup>, 波长间隔变得如此微小, 此时光源波长的微小漂移就不可避免地会引起信道间的相互串扰, 从而影响DWDM系统的性能. 如阵列波导光栅(Arrayed Waveguide Grating, AWG)<sup>[5-6]</sup>最高水平可容纳4 200个通道, 信道间隔小至5 GHz, 其光源工作波长需高度锁定. 另外, 环境温度及激光器控制电路的噪声等因素也会引起激光器的波长漂移<sup>[7]</sup>. 因此, 非常有必要研究出一种性能优良的波长锁定方法.

实现波长锁定的方法有很多, 如铷原子吸收法<sup>[8]</sup>、体布拉格光栅法<sup>[9]</sup>、双光纤布拉格光栅法<sup>[10]</sup>, 以及法布里-帕罗(FP)标准具法<sup>[11-12]</sup>等, 其中FP标准具的透射率与波长呈周期性变化关系, 当波长位于一个透射峰的上升或下降沿的中点时, 透射率 $T(\lambda)$ 随波长 $\lambda$ 的变化最快. 通过扩束器将激光分为2束, 一束经过FP标准具, 另一束作为参考光, 比较

2束光的光强差, 并负反馈地调节激光器的输入电流, 可达到对波长锁定. 以上几种方法还略有不足: (i) 铷原子吸收法只能对一个事先设定好的波长进行锁定, 不具备通用性; (ii) 体布拉格光栅法、双光纤布拉格光栅法和FP标准具法的波长稳定度需进一步提高.

利用自由空间耦合技术<sup>[13]</sup>, 在亚毫米尺度金属包覆波导中可激发超高阶导模<sup>[14]</sup>. 研究表明: 此种导模偏振无关, 且对光源波长、波导厚度和折射率变化极其灵敏. 超高阶导模的这些特性已用于监测角位移<sup>[15]</sup>、液体浓度<sup>[16-17]</sup>、生物分子相互作用<sup>[18]</sup>、波长变化<sup>[19-23]</sup>等. 本文组合2个相同的双面金属包覆波导, 一个工作在超高阶导模的上升沿中点, 另一个工作在超高阶导模的下降沿中点, 两者的反射光强随光源波长的变化情况相反, 利用两反射光强的差分信号来负反馈调节激光器的工作电流, 以达到光源波长的锁定. 此种方案制作工艺简单且波长稳定度更高.

## 1 基于反射光强变化信号的波长传感

亚毫米尺度双面金属包覆波导结构如图1所示, 该结构从上至下依次为: 金属耦合层、导波层、金属衬底3个部分. 激光入射到双面金属包覆波导结构, 根据菲涅尔反射率公式有

收稿日期: 2013-10-16

基金项目: 国家自然科学基金(61265001)和江西省教育厅科技课题(GJJ13237)资助项目.

通信作者: 桑明煌(1967-), 男, 江西德安人, 教授, 主要从事量子光学方面的研究.

$$R(\theta) = |(r_{01} + r_{123} \exp(2i\kappa_1 h)) / (1 + r_{10} r_{123} \exp(2i\kappa_1 h))|^2,$$

$$r_{123} = (r_{12} + r_{23} \exp(2i\kappa_2 d)) / (1 + r_{12} r_{23} \exp(2i\kappa_2 d)),$$

$$r_{ij} = \begin{cases} (\kappa_i - \kappa_j) / (\kappa_i + \kappa_j), & \text{TE 模,} \\ (\kappa_i \varepsilon_j - \kappa_j \varepsilon_i) / (\kappa_i \varepsilon_j + \kappa_j \varepsilon_i), & \text{TM 模,} \end{cases}$$

其中  $d$  和  $h$  分别为导波层和耦合层的厚度  $r_{ij}$  为第  $i$  层介质和第  $j$  层紧密介质之间的菲涅耳反射系数  $\varepsilon_i$  为第  $i$  层介质中的介电系数  $i, j = 0, 1, 2, 3$  分别表示空气、金属耦合层、导波层、金属衬底.  $\kappa_i = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_i - \beta^2}$  和  $\beta = k_0 \sqrt{\varepsilon_0} \sin \theta$  分别为导波层中纵向传播常数和横向传播常数  $k_0 = 2\pi/\lambda$   $\lambda$  和  $\theta$  分别为自由空间中的波数、激光波长和入射角.

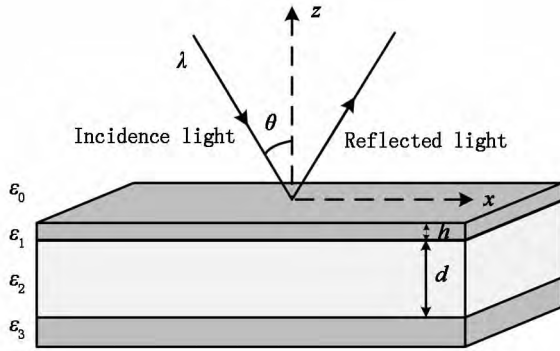


图1 双面金属包覆波导

当激光入射角  $\theta$  很小时,在亚毫米尺度双面金属包覆波导中可激发超高阶导模,其模式色散方程可近似写为

$$\kappa_2 d = m\pi \quad m = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

其中  $m$  为导模序数<sup>[24]</sup>. 由(1)式可得

$$dN/d\lambda = (N^2 - \varepsilon_2) / (N\lambda), \quad (2)$$

由(2)式可知,对于超高阶导模( $N \rightarrow 0$ )当波长发生微小的变化时,波导的有效折射率  $N$  会急剧改变.采用角度扫描可得到其衰减全反射角度扫描谱,当入射角度固定后,入射光波长的微小变化会引起吸收峰的显著移动,因此可引起反射率的明显改变.图2为2个不同波长的衰减全反射峰,其计算参数分别为  $\lambda_1 = 632.800 \text{ nm}$   $\lambda_2 = 632.802 \text{ nm}$   $h = 22 \text{ nm}$   $d = 0.5 \text{ mm}$ , 金属衬底厚  $300 \text{ nm}$ , 介电常数  $\varepsilon_0 = 1$   $\varepsilon_1 = -28 + 1.8i$ ,  $\varepsilon_2 = 2.25$   $\varepsilon_3 = -28 + 1.8i$ . 理论计算结果表明,采用自由空间耦合技术,双面金属包覆波导可实现精度为  $0.5 \text{ pm}$  的波长检测.

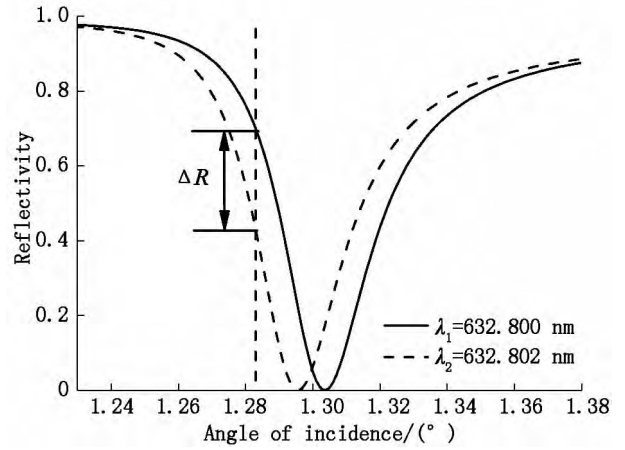


图2 2个不同波长的衰减全反射峰

## 2 基于反射光强差分信号的波长锁定

本文提出的波长锁定器主要是由2个相同的亚毫米尺度双面金属包覆波导构成,实验光路如图3所示.2个双面金属波导放置在  $\theta/2\theta$  转盘上,激光由激光器发出依次经过小孔1、平面镜反射、小孔2,最后通过扩束器分成2束等能量的光,分别以  $\theta_1$  和  $\theta_2$  入射角入射到2个相同的双面金属包覆波导结构上.2个探测器放在  $\theta/2\theta$  转盘上保证时刻跟踪并测量反射光强.探测器接收信号后输入比较仪,分析差分信号后进入处理器,将结果反馈给热能转换器,通过热能转换器调节激光器的温度来达到对激光波长的锁定.

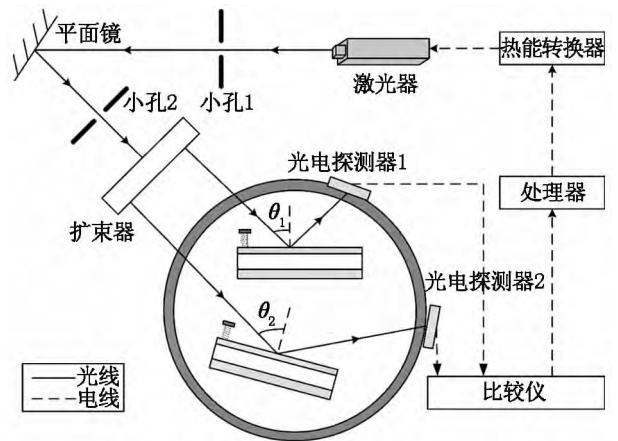


图3 实验装置图

在图3中,2个双面金属包覆波导分别选择入射角  $\theta_1$  和  $\theta_2$ ,使得由  $\theta_1$  入射的光恰好在衰减全反射峰上升沿的中点,由  $\theta_2$  入射的光恰好在衰减全反射峰下降沿的中点.由图4可知,以此相交点作为稳频参考点可得到较高的稳定度.当激光器的输出波长

$\lambda = \lambda_0$  时,两波导的反射光强相等,比较仪就接收到 2 个相等的电信号,信号差分处理后结果为 0,无信号输出。这时半导体激光器的输出波长就保持不变;当外界发生扰动使激光器的输出波长向长波长方向漂移( $\lambda > \lambda_0$ ),则以角  $\theta_1$  入射光的反射光强大于以角  $\theta_2$  入射光的反射光强,这时比较仪接收到的 2 个电信号经差分处理后为正;当外界发生扰动使激光器的输出波长向短波长方向发生漂移( $\lambda < \lambda_0$ ),则以角  $\theta_1$  入射光的反射光强小于以角  $\theta_2$  入射光的反射光强,这时比较仪接收到的 2 个电信号经差分处理后为负。通过信号处理器输出的差分信号来负反馈调节激光器的温度,使得激光器的输出波长重新回到这 2 个双面金属包覆波导的稳频参考点,以此对波长进行锁定。

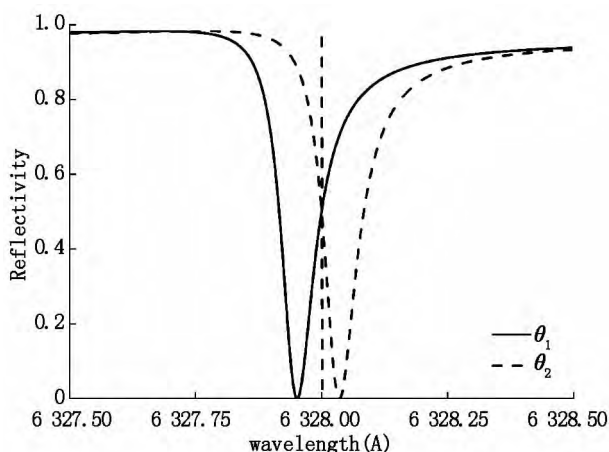


图4 波长稳定方案的原理图

对于此波长锁定器,由于 2 块波导的结构及参数相同,只是入射角略有不同,所以衰减全反射技术波长锁定的灵敏度定义为

$$S = \frac{R_1 - R_2}{\Delta\lambda} = \frac{\Delta R}{\Delta\lambda} \approx 2 \left( \frac{\partial R}{\partial \theta} \right) \left( \frac{\partial N}{\partial \lambda} \right) = 2S_1S_2,$$

其中  $S_1$  表示衰减全反射峰在稳频参考点工作位置的最大斜率,当参数给定,可由反射光强随入射角度变化的曲线计算得出; $S_2$  表示波长的色散特性。定义比较仪可精确测定最小反射光强差分信号为  $\Delta R_{\min}$ ,则此波长锁定器的波长稳定度为

$$\Delta\lambda_{\min} = \Delta R_{\min} / S,$$

使用双布拉格光纤光栅法,980 nm 半导体激光器在 0 ~ 70℃ 时可以实现 0.50 nm 的波长稳定度,与之比较基于双面金属包覆波导反射光强差分信号的波长锁定器可达 0.60 pm 的波长稳定度,计算过程中  $\Delta R_{\min}$  取 0.2%<sup>[25]</sup>。

### 3 结论

本文提出了一种新的波长锁定方法。该方法基于双面金属包覆波导可激发超高阶导模,当入射波长发生微小变化时,其反射光强会急剧改变。通过处理 2 个双面金属包覆波导反射光强的差分信号来负反馈调节激光器的温度,达到波长的锁定目的。与单个情况相比,波长锁定稳定度提高 2 倍,且可有效地避免激光光源光强波动带来的误差。理论计算表明,波长锁定稳定度可达 0.60 pm,较 FP 标准具法提高 1 个数量级。此波长锁定器有望解决密集波分复用系数中的信号串扰问题,提高电信网络的通信容量。

### 4 参考文献

- [1] Strand J. Issues for routing in the optical layer [J]. IEEE Commun Mag, 2001, 39(2): 21-25.
- [2] 蔡明峻,蔡定平,王安廷,等. 光纤通信系统中 DWDM 技术的近期发展 [J]. 光电子技术与信息, 2001, 14(1): 1-10.
- [3] 庾晋,周洁. DWDM 技术 [J]. 电力系统通信, 2001, 22(6): 31-33.
- [4] Yamada E, Takara H, Ohara T, et al. 150 channel super-continuum CW optical source with high SNR and precise 25 GHz spacing for 10 Gbit/s DWDM systems [J]. Electron Lett, 2001, 37(5): 304-306.
- [5] Lee H J, Lyn G Y, Park S Y, et al. Multichannel wavelength locking using transmission peaks of all AWG for multichannel optical transmission systems [J]. IEEE Photonic Tech, 1998, 10(2): 276-278.
- [6] Tachikawa Y, Inoue Y, Kawachi M, et al. Arrayed-waveguide grating add-drop multiplexer with loop-back optical paths [J]. Electron Lett, 1993, 29(24): 2133-2134.
- [7] 张敬明,郑宝真. GaAs-Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As DH 激光器近场光谱的研究 [J]. 半导体学报, 1982, 3(1): 1-7.
- [8] 张量,李义民,王庆吉. 一种锁定半导体激光器频率的新方法 [J]. 计量学报, 1993, 14(4): 290-292.
- [9] Volodin B L, Dolgy S V, Melnik E D, et al. Wave-length stabilization and spectrum narrowing of high-power multi-mode laser diodes and arrays by use of volume Bragg gratings [J]. Opt Lett, 2004, 29(16): 1891-1893.
- [10] 胡双双,李毅,蒋群杰,等. 基于双光纤布拉格光栅的抽运激光器波长锁定器 [J]. 中国激光, 2008, 35(1): 44-48.
- [11] Yang Chunliang, Lee Sanliang, Wu Jingshown. Wavelength control of tunable dense wavelength-division multiplexing

- sources by use of a Fabry-Perot etalon and a semiconductor optoelectronic diode [J]. Appl Opt ,2004 ,43 ( 9 ) : 1914-1921.
- [12] Nasu H ,Takagi T ,Shinagawa T ,et al. A highly stable and reliable wavelength monitor integrated laser module design [J]. J Lightwave Technol 2004 22( 5 ) : 1344-1351.
- [13] Li Honggen ,Cao Zhuangqi ,Lu Haifeng ,et al. Free-space coupling of a light beam into a symmetrical metal-cladding optical waveguide [J]. Appl Phys Lett ,2003 ,83 ( 14 ) : 2757-2759.
- [14] Lu Haifeng ,Cao Zhuangqi ,Li Honggen ,et al. Study of ultrahigh-order modes in a symmetrical metal-cladding waveguide [J]. Appl Phys Lett ,2004 ,85 ( 20 ) : 4579-4581.
- [15] Chen Fan ,Cao Zhuangqi ,Shen Qishun ,et al. Optical approach to angular displacement measurement based on attenuated total reflection [J]. Appl Opt ,2005 ,44 ( 26 ) : 5393-5397.
- [16] Gu Jianghua ,Chen Guang ,Cao Zhuangqi ,et al. An intensity measurement refractometer based on a symmetric metal-clad waveguide structure [J]. J Phys D: Appl Phys 2008 , 41( 18 ) : 185105.
- [17] Chen Guang ,Cao Zhuangqi ,Gu Jianghua ,et al. Oscillating wave sensors based on ultrahigh-order modes in symmetric metal-clad optical waveguides [J]. Appl Phys Lett 2006 , 89( 8 ) : 81120.
- [18] Xiao Ping ,Wang Xianping ,Sun Jingjing ,et al. Biosensor based on hollow core metal-cladding waveguide [J]. Sens Actuators A: Physical 2012 ,183: 22-27.
- [19] Chen Lin ,Cao Zhuangqi ,Shen Qishun ,et al. Wavelength sensing with subpicometer resolution using ultrahigh order modes [J]. J Lightwave Technol 2007 25( 2 ) : 539-543.
- [20] Lu Haifeng ,Cao Zhuangqi ,Li Honggen ,et al. Polarization-independent and tunable comb filter based on a free-space coupling technique [J]. Opt Lett 2006 31( 3 ) : 386-388.
- [21] Wang Qiang ,Farrell G ,Freir T ,et al. Low-cost wavelength measurement based on a macrobending single-mode fiber [J]. Opt Lett 2006 31( 12 ) : 1785-1787.
- [22] 桑明煌 ,李新华 ,余子星 等. 基于对称金属包覆波导的高精度微位移测量 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013 37( 2 ) : 111-115.
- [23] 桑明煌 ,周行 ,戴海浪. Laplace 方程的 Green 函数解法的研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013 37 ( 5 ) : 479-481 487.
- [24] Cao Zhuangqi. The ATM theory of waveguides [M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press 2000.
- [25] Homola J ,Yee S S ,Gauglitz G. Surface plasmon resonance sensors: review [J]. Sens Actuators B: Chem ,1999 54: 3-15.

## Utilizing the Intensity Difference Signal of the Reflected Beam from the Symmetrical Metal-Cladding Waveguide to Achieve the Locking of Wavelength

YANG Zhen ,WANG Xian-ping ,SANG Ming-huang\*

( College of Physics and Communication Electronic ,Jiangxi Normal University ,Nanchang Jiangxi 330022 ,China)

**Abstract:** A wavelength locking method ,which can avoid the errors resulted from the fluctuation of laser intensity and greatly enhance the stability of wavelength locking ,is theoretically analyzed based on the differential signal of the light intensity and the high sensitivity of the ultrahigh-order mode responding to a slight variation of wavelength in the symmetrical metal-cladding waveguide. A pm wavelength locking is archived and the fabrication process of device is very simple.

**Key words:** symmetry metal-cladding waveguide; ultrahigh-order mode; difference signal of light intensity; wavelength locking

( 责任编辑: 冉小晓)